

## 随 想

## 学術貢献賞を受賞して（空気圧とともに）\*

則次 俊郎\*

\* 平成 30 年 6 月 12 日原稿受付

\*\*美作大学／美作大学短期大学部 地域生活科学研究所，〒708-8511 岡山県津山市北園町 50

## 1. はじめに

この度は、学術貢献賞をいただき大変名誉なことと感謝している。いただいた賞状には、「多年フルードパワーシステム工学・技術の研究に従事し、その間多数の論文を発表して本分野に多大の貢献をした。また、学会の理事として学会の運営発展のため力を尽くした。」との受賞理由を記述いただいている。過分の評価をいただき恐縮しているが、筆者の研究歴は、一貫して「空気圧とともに」あったように思う。空気圧技術の分野拡大のためいくつかの学会に参加したが、筆者にとって日本フルードパワーシステム学会は研究者としての原点であり、また故郷のような存在である。その学会から、このような名誉ある賞をいただくことができ、この上ない喜びである。

本稿では、受賞を機会に筆者の研究歴を振り返り、空気圧技術に対する想いの変遷を述べさせていただくことにする。

## 2. 空気圧との出会い

1971 年（昭和 46 年）4 月に、岡山大学工学部生産機械工学科の 4 年生になり、卒業研究ゼミとして和田力先生と清水 顕先生が担当する自動制御研究室に配属された。自動制御に憧れて本学科に入学したため、自動制御研究室への配属は希望の選択であった。後に岡山理科大学の副学長を務めた堂田周治郎先生は同研究室の同期である。当時の岡山大学自動制御研究室では、流体素子（フルイディクス）に関する研究が盛んであった。これは流体素子内の付着噴流の切換えにより OR や AND などの論理演算素子を構成するものである。従来の電磁リレー素子のような機械的可動部がない純流体論理演算素子として注目された。筆者は、付着噴流の切換え現象を利用したパルス発振器や 2 進カウンターの動作解析や設計法について研究した。これらの素子の動作流体はすべて圧縮空気であった。この卒業研究が筆者の空気圧との出会いである。昭和 47 年 4 月に大学院へ進学し、昭和 49 年 4 月に津山工業高等専門学校（津山高専）へ就職した後も、しばらく流体素子の研究を続けた。

これらの研究成果は、主に計測自動制御学会のフルイディクスシンポジウムで発表した。流体素子を用いたパルス発信器（音波形発振器）の研究成果は計測自動制御学会論文集に掲載された<sup>1)</sup>。この発振器では、同一の空気管路内を圧縮波と膨張波が互いに逆方向に交差して伝播する。発振器の動作を理解するためには、これらの圧力波の挙動を説明する必要があり、筆者はこれが図式的に明解に説明できることに気がついた（自分だけが知らなかったのかも知れないが）。その夜は、「明朝早く大学の実験室に行き確認したい」と気分が高揚して眠れなかった。今思えば、大学院 1 年生の狭い知識の中での興奮であろう。この論文は、和田先生と清水先生に何度も添削していただき投稿した筆者の最初の学術論文である。手書きの原稿が活字になった時の喜びは忘れられない。

フルイディクスシンポジウムには、香川利春先生や小山 紀先生、堂田周治郎先生を始め、現在フルードパワーシステム学会でご活躍の何人かの先生方が参加しておられた。筆者は、これら流体素子関係の一連の研究成果をまとめて、1982 年（昭和 57 年）9 月に、花房秀郎先生のお世話で京都大学より工学博士の学位をいただくことができた。

### 3. 空気圧研究の始まり

津山高専在職時の昭和 53 年 4 月から昭和 54 年 3 月まで文部科学省内地研究員として、宇治市の京都大学オートメーション研究施設の花房秀郎先生の研究室へ留学した。留学の目的の一つは、それまでの研究成果をまとめた学位取得であった。当時の津山高専の石原恒夫教授に 1 年間の留学について温かい配慮をいただいた。その当時の花房研究室には、花房秀郎先生(教授)の他に吉川恒夫先生(当時 助教授)、浅田春比古先生(当時 助手)が在籍され、そうそうたるメンバーであった。

花房研に留学後間もなく、花房先生から空気圧シリンダの位置決めに関する研究テーマをいただいた。空気圧シリンダの高精度位置決めのためには最終停止動作の直前に安定な低速送り(クリープ速度)の実現が望まれるが、空気圧固有の減衰能不足のため容易でない。これを克服するためいくつかのダンピング補償法が研究されていたが、筆者は一時的に両シリンダ室を結合すれば回路のダンピングが向上することに気が付いた。花房先生にお話しすると、「それは面白い」と褒めていただいた。この成果は、花房先生との連名で日本機械学会論文集に掲載された<sup>2)</sup>。この論文が、筆者のいわゆる空気圧研究の始まりである。

空気圧駆動回路のダンピング補償には、それぞれのシリンダ室へ細管を通して一定の容量を取り付ける動的圧力制御方式などがあり、シリンダ室結合方式もそれに類することを後で知った。

その後も花房先生には「空気圧は、そのコンプライアンス(柔軟性)を活かした使い方をすべきだ。」とアドバイスいただいたことが常に念頭にある。後の福祉介護分野への応用研究はその流れである。指導者の言葉の重みを改めて感じる。

### 4. 空気圧サーボの導入

1982 年に学位を授与され流体素子に関する研究が一段落した後、津山高専において本格的に空気圧サーボの研究を始めた。当時は空気圧アクチュエータの制御はオンオフ動作によるオープンループ制御が一般的であったが、筆者は空気圧アクチュエータの高機能化のためには連続動作によるフィードバック制御の導入が不可欠であると考えいくつかの手法を試みた。

連続動作を実現するため小型・高速のオンオフ電磁弁を PWM(パルス幅変調)駆動や PCM(パルスコード変調)駆動することにより電空比例弁を模擬することにより連続的なフィードバック制御を実現した。さらに、1983 年ごろからその当時国内空気圧機器メーカーから発売された電空比例流量制御弁を用いてラジアルピストン型空気圧モータの回転速度のフィードバック制御を試みた。自作の実験装置では、空気圧モータにトルクメータと負荷トルクを与える電磁ブレーキが取り付けられていた。かなり贅沢な装置であるが、初めて科学研究費に採択された研究であった。

また、今のようにパソコンが安価に利用できる時代ではないため、OP アンプやトランジスタなどのアナログ素子を用いて PID や I-PD コントローラを自作した。自作した積分回路の出力が 14.5V 付近で飽和した。積分すれば出力はどんどん増えるように思うが、OP アンプの電源電圧 15V を越えることはないしばらくして気付いた。微分器も同様である。また、トランジスタによる電磁弁駆動回路で、新しいトランジスタで電磁弁を一度オンしてオフのあと 2 回目はオンできない。1 回目のオフのとき発生したサージ電圧によりトランジスタが壊れたのである。ダイオードをサージキラーとして付加すればこの問題は簡単に解決した。教科書に書いてはいるが、体験から獲得した知識は有機的である。岡山大学へ移動後、機械工学科の学生向けの「電気工学」の講義で、「サージ電圧はウォータハンマーと同じだ」と言った時、学生も私も妙に納得した雰囲気であったことを覚えている。

この研究において、負荷トルクの変動に対してモータの回転速度を目標速度に維持することができ、フィードバック制御の威力を実感した。成果は本学会の「油圧と空気圧」に掲載された<sup>3)</sup>。この論文に対して、1987 年に当時の日本油空圧学会から学術論文賞を授与された。筆者にとって初めていただいた論文賞であり、大変嬉しく、また晴れがましい想いであったことを覚えている。

1986 年に岡山大学へ移動するまでの津山高専における 7 年間(1 年間の京都大学留学を含む)は、自身による装置やコントローラの製作や実験など、筆者にとってきわめて有意義な期間であった。

## 5. 空気圧サーボ系の高機能化と応用

1986年4月に岡山大学の和田 力研究室の助教授として配置替えとなり、その後も空気圧サーボの研究を続けた。研究室の大学院生や卒研生（4年生）とともに機動的に研究活動を進めることができるようになった。津山高専から移管した空気圧駆動装置（空気圧シリンダと4個の電空比例流量制御弁から構成される）を制御対象として、主に先端的な制御理論の導入による空気圧シリンダの位置決め精度や力制御性能の向上を試みた。初めてパソコンを用いた制御システムを構成した。最初に導入した最適制御理論の適用では、大学の情報処理センターのバッチ処理によりリカッチ方程式を解いて状態フィードバックゲインを求めた。評価関数の中の重み係数の試行錯誤は半日単位であった。この研究では、制御理論により電空比例流量制御弁の応答遅れ（当時、約40ms）を補償することにより制御性能を向上させた。当時のパソコンの処理速度の制約により制御系のサンプリング周期を10msとし、制御弁の遅れを4サンプリング分のむだ時間として処理した。次に同様の装置に対して適応制御理論を適用した。極配置制御法を用いてパラメータ値が未知の空気圧シリンダ駆動系において安定な位置決め動作が実現された。また、駆動負荷の質量や外力変化に対して満足できる適応性が確認された。この成果は、計測自動制御学会論文集に掲載されるとともに<sup>4)</sup>、1991年に油空圧機器技術振興財団から学術論文顕彰を受けた。さらに、同装置を用いた力制御にも適応制御を応用した。この他、ポジカスト制御、ファジィ制御、ニューラルネットワーク制御などを応用し、それぞれの効果を検証している。

また、空気圧サーボ系の制御に関する知見に基づいて、企業との共同によりアクティブエアサスペンションや空気式除振台の振動制御について研究した。

これらの研究と並行して、1990年ごろから企業との共同により2関節型空気圧ロボットの制御に関する研究を始めた。ロボットのアクチュエータは関節に直接取り付けられたロータリー型空気圧アクチュエータであり、制御弁にはPCM制御弁を用いた。制御手法にロバスト制御法の一つであるスライディングモード制御を用いた。これによりロボットの制御性能の向上を図るとともに、ロボットの代表的な制御方式として注目されていたコンプラインス（柔軟性）制御や位置と力のハイブリッド制御を実施した。

さらに、1992年に大学院修士課程を修了後、岡山大学工学部助手（当時）として研究室に残った高岩昌弘君（現 徳島大学教授）を中心に、外乱オブザーバを空気圧サーボ系の高機能化に応用した。外乱オブザーバの導入は空気圧サーボ系の高機能化に大きく貢献した。また、外乱オブザーバを用いて制御される6組の空気圧サーボ系を用いてスチュアート型パラレルリンクマニピュレータを構成して良好な制御性能を得ている。これは6組のサーボ系の運動に伴う軸間干渉の影響などを外乱オブザーバにより補償できたことが一つの要因である。このパラレルリンクマニピュレータは、主に、人間との接触を伴う手首のリハビリテーションや感覚提示などに応用され、現在も研究が続いている。

現在、空気圧サーボ系の高機能化は著しく、筆者が京都大学あるいは津山高専において空気圧サーボの研究を始めたころに比べると隔世の感がある。

## 6. 空気圧ゴム人工筋の導入

1980年代の中ごろ、ブリヂストンが「ラバチュエータ」の製品名でマッキベン型空気圧ゴム人工筋を商品化した。早速、研究室で1セット購入してその特性を調べた。発生力が大きく、アクチュエータとしての出力/重量比が極めて大きい。さらに、同社はラバチュエータを用いた3関節型ロボットアームを商品化し、大きな注目を浴びたが、高精度な位置制御や安定した速度制御の要求に応えることは容易でなかった。筆者の研究室では、同社からロボットマニピュレータの提供を受けて制御性能向上に取り組んだ。空気圧アクチュエータの柔軟性は人間と接触を伴う作業に適すると考え、このマニピュレータをリハビリテーション支援ロボットに応用した。産業用ロボットに適用されるインピーダンス制御法を用いて各種の訓練運動モードを統一的に実現できることを示した。研究成果は1995年の日本ロボット学会誌に掲載された<sup>5)</sup>。当時、この分野の研究はほとんどなく時期尚早であった感も否めないが、筆者にとって空気圧ゴム人工筋の本格的な導入の始まりである。第2報、第3報と続けられなかったことは残念である。

その後、ブリヂストンが「ラバチュエータ」の生産を中止したため、ラバチュエータを手持ちの研究者から

譲っていただいて研究を継続した。当時からマッキベン型人工筋はドイツとイギリスのメーカにより市販されていたが手軽には利用できなかった。

「ラバチュエータ」の生産中止により空気圧ゴム人工筋を用いた研究が困難になりかけたころ、研究室のある学生から「マッキベン型ゴム人工筋は作れます」との提案があった。人工筋の素材であるゴムチューブはいくつかのメーカの品を試行錯誤したが、結果的に、一卷（例えば 30m）数千円のゴムチューブと FL チューブ（電線などを束ね保護するためのネット状チューブ）を用いて、研究室において任意の長さの人工筋を自作することが可能になった。当時の研究室には、ゴムチューブの規格に応じて小径から大径まで数種のゴムチューブと FL チューブの在庫があった。市販の人工筋の性能と遜色ないゴム人工筋が、任意の長さで安価に自作できることが明らかになった。

1996 年度～2000 年度には、日本学術振興会の未来開拓学術研究推進事業において、東京大学の井上博允教授が代表を務めるマイクロメカトロニクス・ソフトメカニクス研究分野の「マイクロ・ソフトメカニクス統合体としての高度生体機能機械の研究」グループの一員に加えていただいた。この時期から、ソフトアクチュエータやソフトメカニクスの概念が定着し、空気圧ゴム人工筋は代表的なソフトアクチュエータの一つとして認識された。この事業を通して、第一線のロボット研究者との交流の機会を持つことができ貴重な経験であった。

## 7. 空気圧ゴム人工筋を用いたパワーアシスト装置

筆者は農家の生まれであり、空気圧ゴム人工筋を用いたパワーアシストロボットの研究のきっかけは農作業の負担軽減であった。例えば、桃の袋掛けなどでは両腕を頭上に掲げての作業が多く、空気圧ゴム人工筋を身体に取り付けて腕の保持ができればよいと考えた。任意の長さのゴム人工筋が安価に自作できれば、「これを用いて色々なことができるようになる」と気持が高揚した。まず 3 本のマッキベン型空気圧ゴム人工筋を身体に取り付け、人工筋の収縮により腕の持ち上げと内転動作を支援する装置を試作したところ支援効果は十分であった。

その後、身体の各部位の動作を支援するパワーアシスト装置を開発した。立位保持装具にマッキベン型空気圧ゴム人工筋を取り付けて構成した立ち上がり動作支援装置の効果はいくつかの論文で紹介されているが<sup>6)</sup>、支援がない場合の約 10% 程度の負担で立ち上がることができる。この装置を岡山市内の社会福祉施設や岡山大学病院において下肢麻痺者に装着して、立ち上がりや歩行支援などの実証試験を行った。また、平成 2006、2007 年度の経済産業省地域新生コンソーシアム事業「トイレ支援用パワーアシストウェアに関する研究開発」として産学官連携による研究開発を推進した。一連の研究開発は地域の多くのマスコミ（TV や新聞）に取り上げていただいた。

2004 年度～2008 年度には、東京大学の樋口俊郎教授が代表を務める文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「ブレイクスルーを生み出す次世代アクチュエータ研究」において、サブテーマ「空気圧ソフトアクチュエータの開発と人間親和メカニズムへの応用」を担当させていただいた。一連の研究を通して、いくつかの形態の空気圧ゴム人工筋を開発するとともに多くのパワーアシスト装置を開発した。

## 8. パワーアシストウェアへの展開

立ち上がり動作のように大きな支援力が必要な場合には、外骨格型のパワーアシスト装置が効率的である。一方、装置の軽量化や柔軟性のためには、人工筋を直接身体に装着できることが望ましい。そこで、筆者らは、外骨格を用いない柔軟で軽量の衣服状パワーアシスト装置（パワーアシストウェアと呼ぶ）の実現を研究目的の一つに設定した。また人間の関節はすべて回転動作であり、これを直動型人工筋で支援するためには、何らかの機構を用いて人工筋の発生力を回転トルクに変換する必要がある。このような機構を省略するため直接に回転トルクを発生する湾曲型空気圧ゴム人工筋を開発した。伸長型直動人工筋（加圧により軸方向に伸長する）の片側の伸長を抑制したものであり、内部のゴムチューブを加圧することにより片側に湾曲する。

湾曲型空気圧ゴム人工筋の応用例の一つとして、指の曲げ動作を支援する装置（パワーアシストグローブと呼ぶ）を開発した<sup>7)</sup>。手袋の指背の部分に湾曲型ゴム人工筋を取り付けたものである。握り動作や摘み動作の支援が可能であり、また、人工筋を上下逆に取り付けることにより指の伸ばし動作の支援にも利用で

きる。パワーアシストグローブは、大学研究室での基礎研究を経て、2012年に岡山市の企業により商品化されている。このグローブは、2014年1月から岡山市介護機器貸与モデル事業対象商品として一定の条件を満たす人に安価にレンタルされている。現在は、各種施設や展示会などにおいて広報活動を展開している。大学では、筋電とニューラルネットワークを用いて装着者の意思を反映する制御法<sup>8)</sup>などについて研究した。

この他、マッキベン型人工筋を直接に身体に取り付けることによる歩行支援や寝返り動作支援の可能性を示している。筆者の研究室で助教を務めた佐々木大輔先生（現 香川大学准教授）は、引き続きパワーアシストウェアの研究開発を進めている。

外骨格を持たないパワーアシストウェアは、大きな支援力の発生は困難であるが、空気圧ゴム人工筋ならではの形態であり、小型、軽量、柔軟で安全なパワーアシスト装置となる。例えば、衣服の下に着用できるインナーウェアなどとしての使用が可能になれば、その用途は大きく広がると考える。実用化までには、依然としていくつかの課題が残されているが、産学連携などによりさらなる展開を図ることが望まれる。関連の研究成果について、文献9)、10)、11)などを参照いただくと幸いである。

## 9. おわりに

学生時代から現在までを振り返り、主な研究経過について記述した。流体素子からパワーアシストウェアまで、空気圧とともに歩んだ研究生活であった。このように一貫した分野で研究を継続できたのは、文中で紹介させていただいた各先生方のご指導の賜である。また、教育研究とともに推進した研究室スタッフ、そして、その時々夢を共有してくれた学生諸君の頑張りがあってこそその有意義な研究生活であった。この場を借りて関係の皆様にも厚くお礼を申し上げる。

平成30年3月末に津山工業高等専門学校長を定年退職し、現在、津山市内の美作大学へ勤務している。5年ぶりに再び研究者の立場に戻れそうである。当分の間、空気圧との付き合いも続くことになる。

## 参考文献

- 1) 和田 力, 清水 颯, 則次俊郎: 音波形発振器に関する基礎的考察, 計測自動制御学会論文集, Vol.10, No.6, p.730-736 (1974)
- 2) 花房秀郎, 則次俊郎: 空気圧シリンダの高精度位置決めのための圧力制御方式, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.47, No.415, p.328-336 (1981)
- 3) 則次俊郎: 電空比例制御弁を用いた空気圧モータの速度制御, 油圧と空気圧, Vol.16, No.4, p.288-295 (1985)
- 4) 則次俊郎, 和田 力, 矢野坂雅巳: 空気圧サーボ系の適応制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.24, No.11, p.1187-1194 (1988)
- 5) 則次俊郎, 安藤文典, 山中孝司: ゴム人工筋を用いたリハビリテーション支援ロボット (第1報 インピーダンス制御による訓練運動モードの実現), 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.1, p.141-148 (1995)
- 6) Toshiro Noritsugu, Daisuke Sasaki, Masafumi Kameda, Atsushi Fukunaga and Masahiro Takaiwa: Power Assist Device for Standing up Motion Using Pneumatic Rubber Artificial Muscles, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.19, No.6, p.619-628 (2007)
- 7) 佐々木大輔, 則次俊郎, 山本裕司, 高岩昌弘: 空気圧ゴム人工筋を用いたパワーアシストグローブの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.5, p.640-646 (2006)
- 8) 小西秀和, 則次俊郎, 高岩昌弘, 佐々木大輔: 筋電により人間の意思を反映したパワーアシストグローブの制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.49, No.1, p.59-65 (2013)
- 9) 則次俊郎: 空気圧ゴム人工筋を用いたパワーアシストウェアの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.33, No.4, p.222-227 (2015)
- 10) 則次俊郎: 社会実装のための次世代アクチュエータ, 日本ロボット学会誌, Vol.33, No.9, p.660-663 (2015)
- 11) 則次俊郎: 柔軟構造のフルードパワーアクチュエータの展望, フルードパワーシステム, Vol.48, No.1, p.7-11 (2017)

## 著者紹介



のりつぐ としろう

則次 俊郎 君

1974年岡山大学大学院工学研究科修士課程修了。同年津山工業高等専門学校助手、講師、助教授を経て、1986年岡山大学工学部助教授、1991年同教授、2005年同大学大学院自然科学研究科教授、2013年同大学名誉教授、同年津山工業高等専門学校長、2018年津山工業高等専門学校名誉教授、同年美作大学／美作大学短期大学部特任教授、現在に至る。ロボット工学および制御工学の研究に従事。日本機械学会、日本ロボット学会および計測自動制御学会のフェロー。工学博士

E-mail: toshiro@mimasaka.ac.jp